
**Zonificación de la vulnerabilidad ambiental en una cuenca serrana rural,
Argentina**

Gabriela Elba Senisterra¹, Fernanda Julia Gaspari¹, María Isabel Delgado^{1,2}

¹Cátedra Manejo de Cuencas Hidrográficas, FCAyF, UNLP

²Becaria Posdoctoral del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
(CONICET)

FCAyF, UNLP. Diagonal 113 N° 469. CP 1900. Ciudad de La Plata, Buenos Aires.

gseniste@agro.unlp.edu.ar

Recibido: 12 de abril de 2015

Publicado: 30 de agosto de 2015

RESUMEN

La conservación y rehabilitación de tierras constituye una parte esencial del desarrollo agrícola sustentable. En las últimas décadas se ha entablado una discusión en torno al concepto de vulnerabilidad, tomando fuerza en diferentes áreas del conocimiento, considerándose diferentes tipos de vulnerabilidades como son ambiental, social y socioambiental. Este trabajo tuvo como objetivo estudiar los cambios en la vulnerabilidad ambiental espacio-temporal de una cuenca serrana en el período 1986 - 2011. El área de estudio abarcó la cabecera de la cuenca experimental del arroyo Napaleofú, ubicada en el sistema serrano de Tandilia, provincia de Buenos Aires, Argentina. La vulnerabilidad ambiental en la cuenca se estableció a partir de la zonificación cartográfica y procesamiento geoespacial de factores condicionantes (Posición del terreno, Textura del suelo, Vegetación y uso del suelo, Pendiente y Densidad de drenaje) y activadores (Índice de Fournier Modificado), utilizando Sistemas de Información Geográfica. El factor que mayor influencia ejerció sobre la vulnerabilidad ambiental en la cuenca fue el uso del suelo, evidenciado por el aumento de la superficie ocupada por la agricultura en el período estudiado. La determinación del aumento de vulnerabilidad ambiental asociada a los cambios de uso del suelo en la cuenca demostró la necesidad de implementar un plan de ordenamiento territorial, tendiente a la aplicación de prácticas agropecuarias sustentables.

Palabras clave: cuenca hidrográfica, sierras bonaerenses, susceptibilidad ambiental, uso del suelo

ABSTRACT

Conservation and land remediation represents an essential part of sustainable agricultural development. In the last decades it has being initiated a discussion about the concept of vulnerability, including different areas of knowledge, considering different types of vulnerabilities such as the natural, environmental, social and socio-environmental. We aimed to study the changes of spatio-temporal environmental vulnerability of a hilly watershed, for the period 1986-2011. The study area included the upper watershed of the Napaleofú Creek, located in the hilly system of Tandilia, province of Buenos Aires, Argentina. The environmental vulnerability was established by mapping and geospatial process of conditioning (Land position, Soil texture, Land use, Slope and Drainage density) and activating (Fournier Modified Index) factors,

using a Geographic Information System. Land use was the factor that showed more influence on the environmental vulnerability, based on the increase of the area occupied by agriculture in the period 1986-2011. Increment of environmental vulnerability associated with land use changes in the watershed highlighted the need to implement sustainable agricultural practices towards a future territorial management.

Key words: watershed environmental, bonaerenses hills, environmental susceptibility, land use.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se ha entablado una discusión en torno al concepto de vulnerabilidad, considerándose diferentes tipos, como son la natural, ambiental, social y socioambiental (Zanella *et al.*, 2011). La comprensión de la vulnerabilidad ambiental de una determinada zona implica entender con precisión la susceptibilidad o resistencia de un área respecto a los agentes desestabilizadores y debe analizarse teniendo en cuenta las condiciones particulares de cada comunidad (Castro, 1999).

El análisis de vulnerabilidad puede realizarse en diversos ambientes y bajo diferentes condiciones, ajustando la metodología a la realidad del lugar y a la problemática específica. Teutsch-Barros (2006) al estudiar las diferentes aproximaciones metodológicas para evaluar la vulnerabilidad de la población ante desastres asociados con el cambio climático, encontró que a pesar de la existencia de diferentes formas de procesar la información, los diversos métodos se basan en el uso de indicadores de vulnerabilidad, siendo variable la selección de los mismos según la escala de análisis y las características propias de cada lugar.

En particular, las regiones dedicadas a las actividades agropecuarias se ven amenazadas por su degradación, representando dificultades para la producción de alimentos. La degradación se produce por erosión hídrica superficial, compactación y pérdida de fertilidad (Díaz Rivera *et al.*, 2008). Los cambios de cobertura y usos del suelo están relacionados directamente a la generación de escurrimiento superficial y a su vez, tienen una consecuencia directa sobre la erosión de los suelos aumentando la fragilidad de los sistemas ambientales. En la zona serrana del sudeste de la provincia de Buenos Aires, la erosión hídrica superficial provoca una decreciente producción agropecuaria, consecuencia del actual manejo del suelo, la pérdida del horizonte superficial y la disponibilidad de agua superficial y subterránea.

En las últimas décadas, dada la capacidad productiva de los suelos de esta región, los pastizales pampeanos han sido sustituidos por agroecosistemas y evidencian un importante nivel de degradación y un escaso grado de conservación (Vázquez y Zulaica, 2011).

En la planificación, la combinación de factores antrópicos y naturales, en conjunción con las características morfológicas de una cuenca hidrográfica (relieve, red de

drenaje y forma), pueden establecer una zonificación de la vulnerabilidad ambiental (Gaspari *et al.*, 2011).

Una herramienta útil para el análisis de parámetros de vulnerabilidad son los Sistemas de Información Geográfica (SIG), que permiten un procesamiento geoespacial con un alto grado de variabilidad. Existen estudios que han abordado la zonificación de la vulnerabilidad utilizando las bondades que ofrecen los SIG y los sensores remotos (Van Westen y Soeters, 1999).

El objetivo del trabajo fue zonificar, espacial y temporalmente, los cambios en la vulnerabilidad ambiental de una cuenca hidrográfica rural en el sistema serrano de Tandilia Argentina.

METODOLOGÍA

Área del estudio

El área de estudio abarcó la cuenca alta del arroyo Napaleofú, ubicada en el sistema serrano de Tandilia, provincia de Buenos Aires, Argentina (Figura 1), con una superficie de 347,73 km².

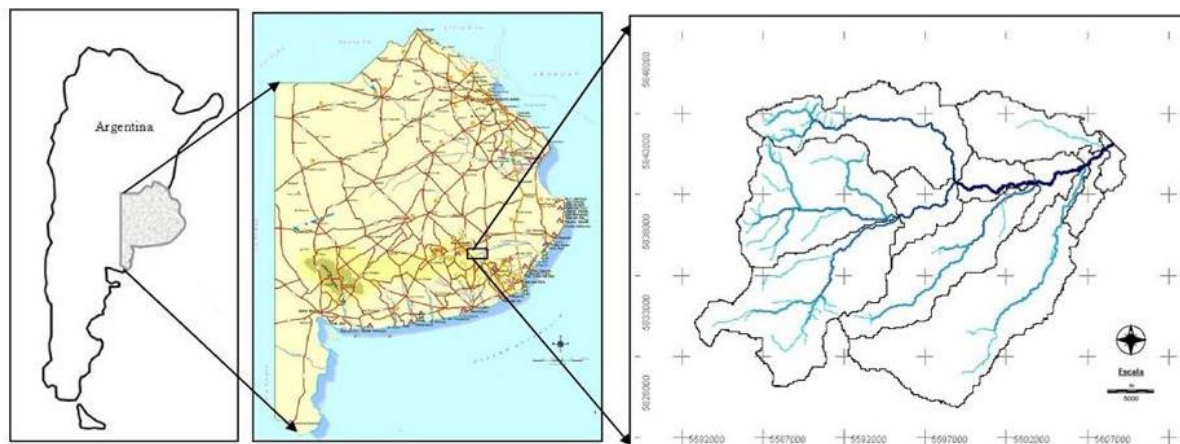


Figura 1. Ubicación de la cuenca alta del arroyo Napaleofú. Argentina.

Según la clasificación climática de Thornthwaite (1957) es un clima C2 B' r a', que indica un clima mesotermal subhúmedo-húmedo, con nula o pequeña deficiencia de agua. Para el período 1968-2010, para la localidad de Tandil la temperatura media anual fue de 13,9 °C y la precipitación media anual de 901 mm. La precipitación máxima se presentó en los meses de octubre y marzo (Barranquero *et al.*, 2012).

Las unidades cartográficas de suelo corresponden a los dominios edáficos 1 y 2, con los grupos predominantes de Argiudoles y Hapludoles, según la carta de Suelos de la República Argentina (escala 1:500.000) descripta en el Atlas de Suelos del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA-Castelar, 1989).

La flora pertenece a la región geográfica de la pampa húmeda, cuya vegetación es la de estepa o pseudoestepa de gramíneas, propias de los pastizales pampeanos (Cabrera, 1976). En esta región las actividades agropecuarias representan uno de los principales factores de impacto ambiental debido al avance sobre nuevas áreas o por una intensificación de la agricultura y la ganadería en las áreas rurales ya existentes (Vázquez y Zulaica, 2011).

Determinación de la vulnerabilidad ambiental

La vulnerabilidad ambiental en la cuenca alta del arroyo Napaleofú se estableció aplicando la metodología de Gaspari *et al.* (2011), para lo cual se realizó la zonificación cartográfica y procesamiento geoespacial de factores condicionantes y activadores, utilizando el SIG Idrisi Taiga ®. Esta metodología se establece a partir de la determinación de factores de dos tipos: activador, representado por una variable extrínseca, la erosividad de la precipitación, y factores condicionantes intrínsecos que caracterizan al terreno, entre los que consideran la condición edáfica (textura del suelo), la morfometría de la cuenca (expresada por la posición y pendiente del terreno y la densidad de drenaje) y la vegetación y el uso del suelo. La combinación de estos factores condicionantes determina la susceptibilidad ambiental.

El factor activador de la erosividad de la precipitación (Chuvieco *et al.*, 2014), fue representado por el Índice de Fournier Modificado (IFM). Este factor expresa la peligrosidad o amenaza en el proceso.

El modelo cartográfico a nivel de cuenca hidrográfica se conformó por la combinación aditiva de los cinco factores condicionantes, determinando la susceptibilidad, y la posterior integración del factor activador para definir la vulnerabilidad en diferentes escenarios de uso del suelo (Figura 2).

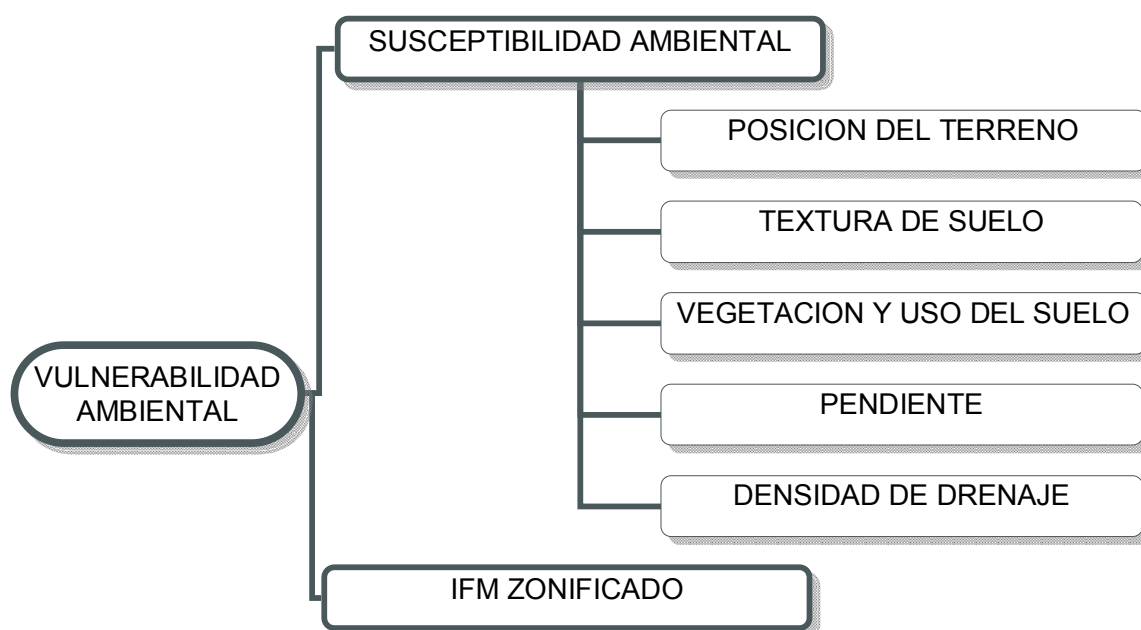


Figura 2. Secuencia cartográfica para la vulnerabilidad ambiental. IFM: Índice de Fournier Modificado.

El procesamiento cartográfico de cada factor se definió por medio de la asignación de códigos de valor, según las siguientes categorías cualitativas:

1. A partir del procesamiento de cartografía topográfica (IGM, 1970) se generó un modelo de elevación digital (MED), para la determinación automática de la ubicación en el paisaje, según las clases de posición del terreno: alta, loma, media loma y valle. Se partió de la información topográfica, en lugar de los modelos digitales de elevación difundidos a nivel mundial, por considerarse que el error para la zona en cuestión se minimizaba de este modo, como por ejemplo expresan Delgado y Gaspari (2010).
2. La zonificación del factor textura de suelo se realizó a partir del análisis de estudios antecedentes de cartografía de dominios edáficos, a escala 1:50.000 (INTA - SAGyP, 1989; INTA-AEROTERRA, 1995; Iruña *et al.*, 2007).
3. Los escenarios temporales de uso del suelo se establecieron para los años 1986, 1996 y 2011. La clasificación se basó en la cartografía de la cobertura vegetal y uso del suelo del estudio de PNUD (1986) Argentina 85/019 como línea de inicio para el año 1986, el cual consideró las siguientes clases de uso: Agricultura (A), Ganadero-agrícola (GA), Ganadería en suelos con roca (G3b),

Agrícola- ganadero (AG) y Montes de reparo o cortinas forestales (M). A partir de esta clasificación, se zonificó el uso del suelo, por compatibilización cualitativa, para el año 1996, por medio de una clasificación no supervisada de una imagen Landsat TM del 26/12/1996. Posteriormente, se realizó una clasificación supervisada de una imagen satelital Landsat ETM+, del 18/01/2011. Ambas fueron obtenidas del Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais de Brasil (INPE). La resolución espacial de las imágenes fue de 30 metros x 30 metros. A partir de éstas se definió una miniescena flotante, escena buffer, algo mayor que los límites de la cuenca (imagen de 2.200 columnas y 2.800 filas). Las bandas del sensor Landsat utilizadas en este trabajo fueron 3, 4, 5 y 7. Estas bandas pueden combinarse de a tres o más, generando imágenes de color compuesto, permitiendo el procesamiento de clasificación.

4. El procesamiento de la inclinación del terreno, utilizando el MED, permitió determinar la pendiente. La misma fue reclasificada en rangos: < 3 %, 3 – 12 %, 12 – 24 % y > 24 %.
5. La densidad de drenaje permitió generar un índice de compacidad de drenaje, con SIG, a partir de cartografía de base vectorial de la red de drenaje y del área de una circunferencia de radio de 5.000 m. Este procesamiento asigna un valor a la celda central de la circunferencia, resultante del cociente entre la longitud total de los drenajes que se encuentran en la misma y su área. Este factor fue categorizado en las siguientes clases: < 20; 20 – 40; 40 – 60; 60 – 80 y > 80.

A partir de la combinación aditiva de los factores condicionantes se estableció la zonificación de la susceptibilidad, la cual se clasificó en cuatro categorías cualitativas, considerando la criticidad sobre el ambiente para los años estudiados.

La vulnerabilidad ambiental se definió por medio de la integración aditiva de la susceptibilidad con el factor activador. Este factor fue la erosividad de la precipitación, cuya magnitud se estableció a través de la variación espacio-temporal del Índice de Fournier Modificado (IFM), desarrollada por Jordan y Bellifante (2000). Para determinar el IFM se utilizaron bases de datos pluviales diarios pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2011), de las localidades de Benito Juárez (-37° 40'; -59° 48'), Tandil (-37° 13'; -59° 13') y Balcarce (-37° 45'; -58° 18'), para el

período 1985-2011. Posteriormente, por medio de un análisis de interpolación del IFM con SIG, se especificó el factor a nivel de cuenca. Se adoptó la clasificación cualitativa de IFM de la Comisión Europea de Medio Ambiente (CORINE, 1992).

La zonificación de la vulnerabilidad para cada año se categorizó en cuatro clases (baja, media, moderada y alta) definidas por rangos particulares intrínsecos descriptivos de cada factor enunciado. Las clases se definieron integrando la susceptibilidad a la agresividad climática. El procesamiento geoespacial por el modelo cartográfico de la vulnerabilidad ambiental se basó en la asignación de códigos numéricos enteros a las categorías de cada una de las capas temáticas, las cuales se conjugaron a fin de obtener un único valor luego de la combinación de las mismas. Esta metodología es de carácter cualitativo y aditivo, expresando adjetivaciones de los diferentes factores condicionantes y activador. Las áreas de mayor susceptibilidad y con presencia de lluvias más agresivas se corresponden a la clase de alta vulnerabilidad ambiental, según una tabulación cruzada de ambas variables, al mismo tiempo las clases bajas de susceptibilidad con bajo IFM se denominaron baja.

La tendencia de cambio espacio-temporal de la vulnerabilidad ambiental se estableció en los escenarios temporales: 1986 - 1996, 1996 - 2011 y 1986 - 2011, con la aplicación del módulo Land Change Modeler (LCM) del SIG Idrisi Taiga®. El LCM es una aplicación diseñada para el análisis y la predicción de cambios, proyectando su tendencia y evaluando sus implicancias (Crespo et al., 2010). Para modelizar los cambios esperados en un determinado territorio, el LCM utiliza dos mapas de cubiertas pertenecientes al mismo lugar y referentes a períodos de tiempo distintos.

RESULTADOS

Los factores condicionantes analizados en la cuenca serrana experimental del arroyo Napaleofú expresaron las siguientes características:

1. La textura del suelo se dividió en tres categorías: Franca, Franca Arcillo-limosa y Arcillo-limosa y/o presencia de roca en superficie, ocupando: 25.646 ha, 6.263 ha y 463 ha, respectivamente.
2. La posición en el terreno se estableció según las siguientes categorías: alta (468 ha), la loma (1.207 ha), la media loma (19.932 ha) y el valle (12.768 ha). El relieve predominante es el plano, suavemente ondulado, con escasa presencia de superficie entre accidentado a muy escarpado.

3. El factor pendiente fue clasificado en rangos: < 3 % (22.717 ha), 3 – 12 % (10.346 ha), 12 – 24 % (1.175 ha) y > 24 % (137 ha). Se observó que el 66,1 % de la superficie de la cuenca presenta pendientes menores al 3 %.
4. El factor de compacidad de drenaje ocupó, según las clases definidas: < 20 (21.983 ha); 20 – 40 (9.644 ha); 40 – 60 (2.064 ha); 60 – 80 (576 ha) y > 80 (108 ha). Los valores determinados se corresponden a una cuenca con baja complejidad y desarrollo del sistema de drenaje, que generalmente se asocia con áreas resistentes a la erosión, permeables y de bajo relieve.
5. La superficie ocupada por las clases de vegetación y uso del suelo para los años analizados, se presenta en la Tabla 1. El mayor cambio se produjo en el período 1986-1996, en el que la ganadería perdió 12,41% de superficie, el uso GA el 2,24%, mientras que ganaron superficie el uso AG en un 10,78% y el uso monte en un 5,97%. En el período 1996-2011, el cambio de uso del suelo fue menor a la del período anterior, siendo negativas para los usos GA (1,85%), G3b (1,98%) y AG (0,96%), ganando superficie los usos M (0,33%) y A (89,5%). El uso A ocupó 6522 has de la cuenca, producto de la agriculturización que se presentó en toda la región pampeana.

Tabla 1. Usos del suelo en la cuenca alta del arroyo Napaleofú.

Usos del suelo y Superficie de ocupación (ha)					
Año	A	GA	G3b	AG	M
1986	-	18.275	10.343	5.632	125
1996	-	14.597	2.988	16.507	283
2011	6.522	11.043	2.219	14.226	365

La susceptibilidad para los años estudiados se presenta en la Figura 3. La superficie de ocupación de las categorías de susceptibilidad ambiental en la cuenca se observan en la Tabla 2.

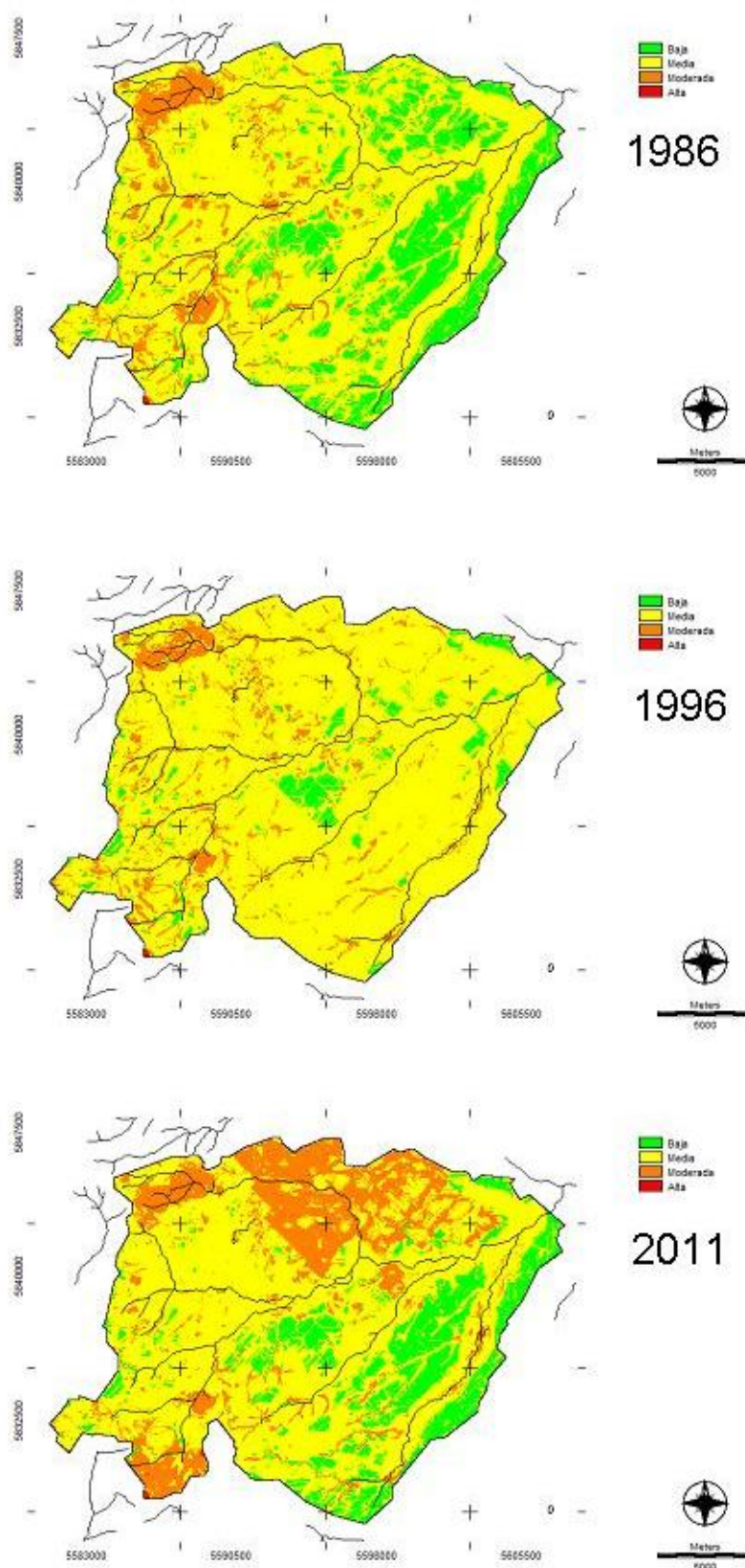


Figura 3. Susceptibilidad ambiental en la cuenca del arroyo Napaleofú para los años analizados.

La zonificación de la susceptibilidad ambiental permitió establecer su distribución espacial e inferir en forma indirecta los atributos relacionados con ésta. La dinámica de cambios integrando los diferentes factores durante el período de tiempo estudiado, se representa como un flujo de terrenos que pasaron de un grado a otro, fuertemente influenciados por el factor condicionante de uso del suelo sobre la morfometría, edafología y el factor activador.

La Tabla 2 indica la variación espacio-temporal de la ocupación por categorías de susceptibilidad ambiental en los años analizados, expresada en la Figura 3, la cual se representa mediante una flecha ascendente y descendente, para el aumento o disminución de su ocupación a partir del año 1986.

Tabla 2. Superficie de ocupación por categorías de susceptibilidad ambiental.

Susceptibilidad	Superficie (ha)		
	Año *		
	1986	1996	2011
Baja	6.327	1.530 ↓	5.037 ↓
Media	24.983	29.799 ↑	22.168 ↓
Moderada	3.047	3.010 ↓	7.141 ↑
Alta	18	36 ↑	29 ↑

↑ La flecha indica aumento o disminución de superficie de ocupación en relación al año 1986.

El balance entre las ganancias y pérdidas obtenido con LCM, a nivel de cuenca, experimentadas por cada categoría de susceptibilidad en el período 1986 – 2011, expresó que la categoría baja perdió 1.288 ha y la media 2.813 ha, mientras que la moderada ganó 4.095 ha y la alta 6 ha.

Respecto al análisis del factor activador, el valor de IFM obtenido para la localidad de Benito Juárez fue 71,12; para Balcarce 87,78 y para Tandil 77,69. En la cuenca el IFM varió entre 78,26 y 81,75. El factor activador (IFM) influyó levemente en la vulnerabilidad ambiental de la cuenca en el período analizado, justificado por la similitud hallada entre los datos analizados de las estaciones meteorológicas. Según CORINE (1992), estos valores se encuadran en el rango de baja erosividad.

El análisis del cambio espacio temporal de la vulnerabilidad ambiental para los períodos 1986-1996 y 1996-2011, permitió establecer el balance de ganancias – pérdidas de superficie de ocupación.

En la Figura 4 se representa el análisis LCM indicando las pérdidas y ganancias en superficie de la vulnerabilidad ambiental. Se visualiza que la categoría de alta vulnerabilidad ocupa menos de 15 ha en los escenarios analizados. El balance para 1986-1996 indica pérdidas en las categorías baja y media, aumentando la moderada, demostrando una agriculturización que eleva la vulnerabilidad del ambiente. En el período 1996-2011 se manifiesta un aumento de superficie de ocupación en la categoría media y un intercambio en las clases de pérdidas entre las categorías baja a moderada. Estas diferencias se pueden atribuir al manejo de las actividades agrícolas, como se expresó en el análisis de la Tabla 1.

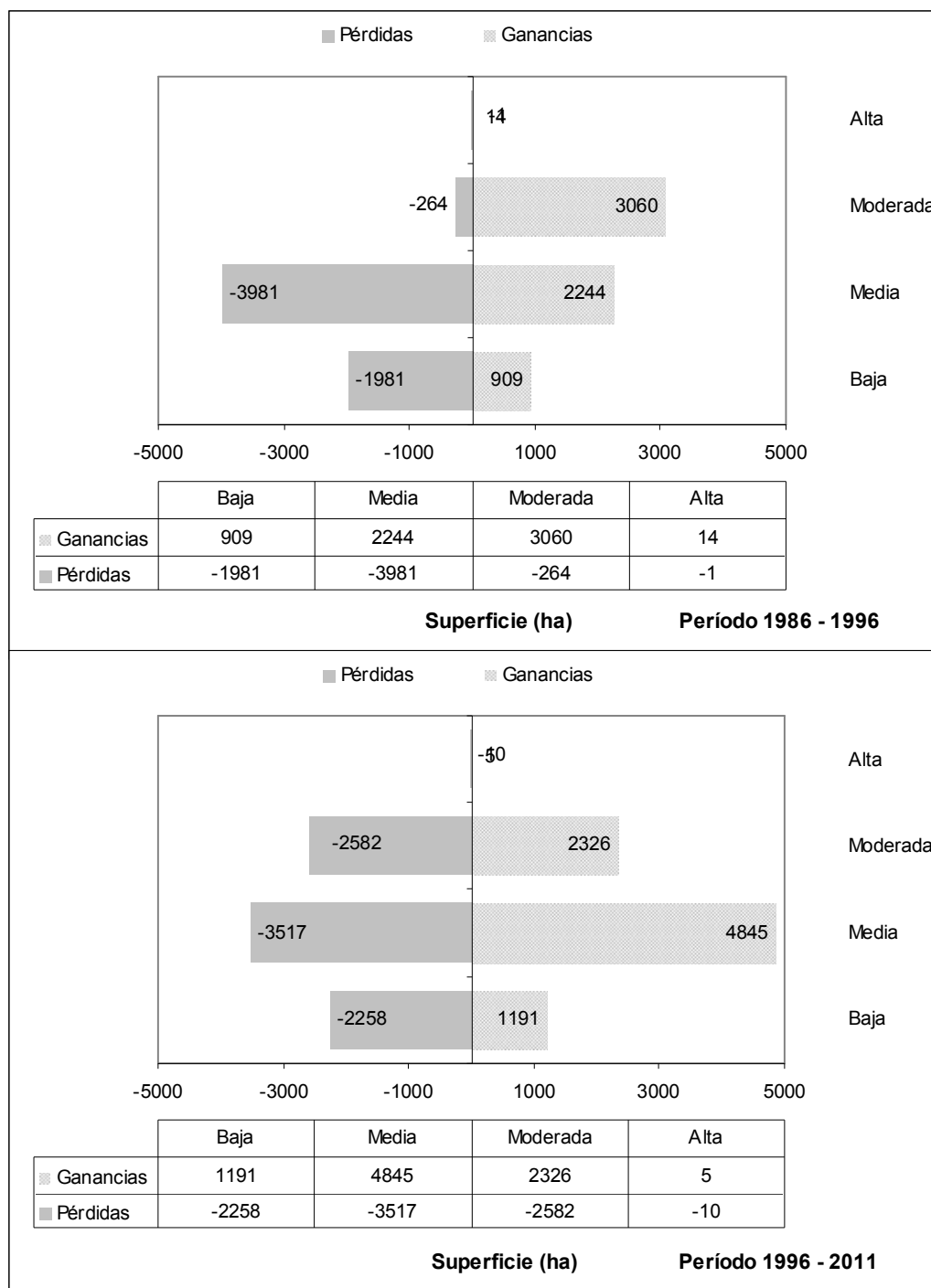


Figura 4. Pérdidas y ganancias de vulnerabilidad ambiental. Expresada en superficie de ocupación, por período de estudio.

La modelización del cambio de la vulnerabilidad en el período 1986-2011 permitió elaborar el mapa de persistencia con el módulo LCM, el cual estableció la persistencia de áreas según las categorías de vulnerabilidad.

A continuación, en la Figura 5, se expresan zonas donde se mantuvieron las clases de vulnerabilidad ambiental (persistencia) en todo el período. Las zonas coloreadas expresan áreas que permanecieron en una clase de vulnerabilidad ambiental, durante este período. Se destacan áreas incoloras donde se representan los posibles cambios de nivel de vulnerabilidad para el período de 25 años. El 19,75 % de la superficie total de la cuenca ha modificado su categoría de vulnerabilidad ambiental, representando 6.849 ha que se corresponden con el cambio de uso del suelo. Este cambio tendió al aumento de la vulnerabilidad ambiental.

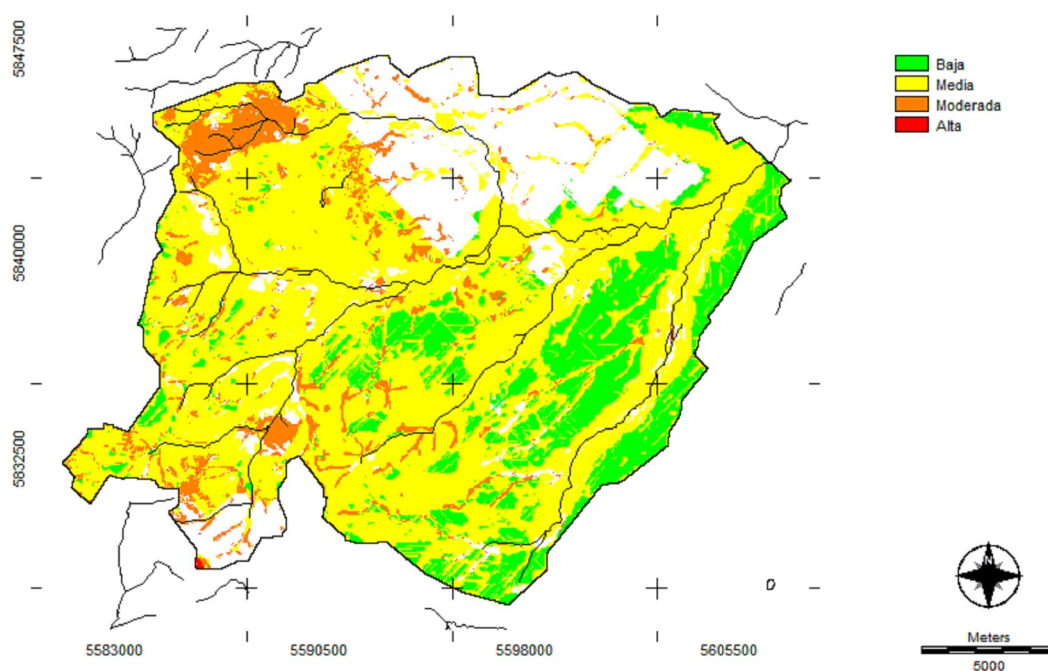


Figura 5. Mapa de persistencia de vulnerabilidad ambiental para el período 1986 – 2011.
Áreas blancas representan sectores con cambios en vulnerabilidad ambiental

Partiendo de la aplicación del LCM en relación a las modificaciones en la zonificación de la vulnerabilidad ambiental, se observaron cambios específicos entre categorías (Figura 6), presentándose sólo las modificaciones en las clases mayores a 10 hectáreas.

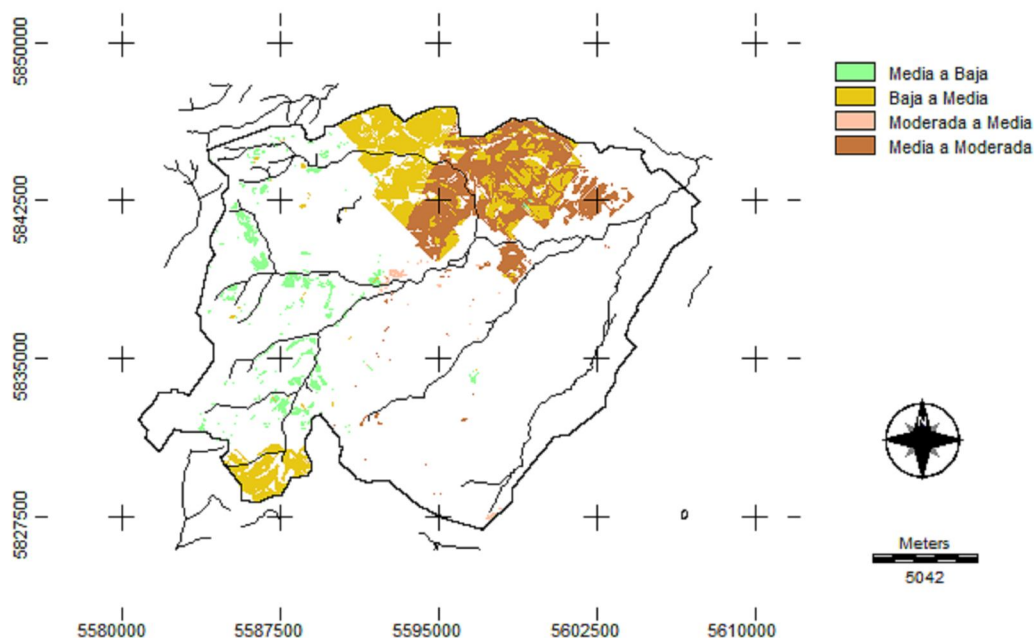


Figura 6. Mapa de cambios de vulnerabilidad ambiental para el período 1986 – 2011.

Se destacan cambios que tienden a incrementar la vulnerabilidad ambiental: la transformación de la categoría media a moderada ocupó 3.364 ha, constituyendo el 49% del total de cambios ocurridos entre categorías; modificaciones de la categoría baja a media con 2.783 ha, que representan el 41% de la totalidad de los cambios observados.

La dinámica se invierte positivamente, presentando 54 ha con un cambio de la categoría moderada a media (1% del total de cambios ocurridos). Los cambios de vulnerabilidad de media a baja se presentaron en 647 ha (9%).

DISCUSIÓN

El aumento en superficie del uso del suelo agrícola detectado en la cuenca alta del arroyo Napaleofú concuerda con lo expresado por López Bidone (2010), quien indica que esta transformación se comenzó a manifestar en la región a partir de la década de 1970, profundizándose a mediados de los 90', cuando el sector agropecuario experimentó un profundo cambio debido a la crisis financiera del país, con un intenso proceso caracterizado por una mayor eficiencia en el uso de los factores productivos,

acompañado por la adopción de cambios técnicos y el desarrollo de nuevas formas organizacionales de la producción, a través de la tecnificación y la diversificación de la producción. Además, como menciona Vázquez (2014), para el partido de Tandil la expansión agrícola fue evidente a partir del año 2010, siendo este proceso no sólo característico de este partido, sino también de la ecorregión de las Pampas.

El cambio de uso del suelo expuesto confirmó, en el análisis espacio temporal de la vulnerabilidad ambiental, que existen áreas donde la agriculturización fue determinante en la modificación y cambio de categoría, incrementando la fragilidad del ambiente. En las zonas donde este uso del suelo no ha sido predominante, se determinó la persistencia de clase de vulnerabilidad.

Asimismo, se coincide con lo expresado por Teutsch-Barros (2006) respecto a que las metodologías de evaluación de vulnerabilidad son herramientas flexibles que pueden y deben ser adaptadas de acuerdo a los requerimientos y posibilidades de cada estudio y región geográfica en particular. Corroborando lo expresado por Van Westen y Soeters (1999), el uso de un SIG fue una herramienta apropiada para la determinación de la vulnerabilidad geoespacial y temporal, adaptándose a los requerimientos y posibilidades de la cuenca en estudio.

El factor activador (IFM) presentó valores de baja erosividad y de escasa variación espacial, la que se puede atribuir a la dificultad para poder aplicarse en territorios donde la red de pluviógrafos existentes es escasa y está irregularmente distribuida, como es el caso de la cuenca en estudio.

En coincidencia con Bereciartua (2003) la confección de un mapa de vulnerabilidad implica combinar varios mapas temáticos, correspondientes a las variables elegidas para la evaluación. Cada uno de estos mapas representa una característica física, social y cultural, que implica o representa un impacto determinado sobre el territorio.

La zonificación de la vulnerabilidad tiene múltiples propósitos, entre ellos la planificación del uso del suelo para la gestión y manejo integral de cuencas hidrográficas. En este estudio, los resultados planteados en el LCM permitirán plantear nuevas estrategias de manejo.

CONCLUSIONES

A partir del estudio espacio temporal del uso del suelo en la cuenca se observó un proceso de expansión agrícola, en detrimento del uso ganadero o mixto. Este proceso

estuvo asociado al avance de la frontera agropecuaria, principalmente la introducción de soja, la rotación de cultivos, la implementación de medidas de conservación de suelo y el cultivo de papa.

La metodología aplicada proporcionó la posibilidad de zonificar la vulnerabilidad ambiental en una cuenca hidrográfica serrana mediante uso de SIG, evidenciando que el cambio de uso del suelo incide en el cambio de la distribución de la vulnerabilidad ambiental.

La determinación del cambio entre clases de vulnerabilidad ambiental en la cuenca demostró la necesidad de diseñar un plan de ordenamiento territorial tendiente a la aplicación de prácticas agropecuarias sustentables. Estas prácticas son necesarias de implementar porque en el estudio se demostró que el cambio de uso del suelo en el período analizado fue el principal factor determinante de la vulnerabilidad de la cuenca, asimismo el IFM tuvo una baja influencia como factor activador de la vulnerabilidad ambiental.

Por último, la aplicación del LCM permitió el análisis de los cambios acaecidos de vulnerabilidad entre los períodos analizados, que fueron modelados empíricamente a partir de un modelo matemático desarrollado en función de los cambios observados. Además, posibilitó el establecimiento de evaluaciones de pérdidas y ganancias, persistencia y transiciones específicas, tanto en forma de gráficos como cartográfica.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el Proyecto N° 11/A223 “Servicios Ambientales de Agroecosistemas para el Ordenamiento Territorial en el sur de la provincia de Buenos Aires”. Programa de Incentivos. Ministerio de Educación de la Nación Argentina.

BIBLIOGRAFÍA

- Barranquero, R. S., Varni, M., Ruiz De Galarreta, A. y Banda Noriega, R. 2012. Aporte de la hidroquímica al modelo conceptual del sistema hídrico subterráneo, Tandil. Argentina. *Geoacta* 37 (2): 130-146 (2012) ISSN 1852-7744. Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas.

-
- Bereciartua, P. 2003. *Vulnerabilidad de Aguas Subterráneas a la Contaminación*. Gestión Ambiental de los Recursos Hídricos – Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires. Argentina. http://materias.fi.uba.ar/6911/vulnerabilidad_gw.pdf
 - Cabrera, A.L., 1976. *Regiones fitogeográficas argentinas*. En: L.R. Parodi (ed.), Enciclopedia argentina de agricultura y jardinería, Editorial Acmé, Buenos Aires, 2da edición, 2: 1-85.
 - Castro, M. 1999. *Cooperación regional para reducir la vulnerabilidad ambiental y promover el desarrollo sostenible en Centroamérica*. En Uribe, A., Franklin, H. Editores. Memorias del taller sobre vulnerabilidad ecológica y social. Estocolmo, Suecia. pp 59 – 88.
 - CORINE. 1992. *Soil erosion risk and important land resources in the southern regions of the European Community*. http://reports.eea.eu.int/COR0-soil/en/soil_erosion.pdf
 - Crespo, R.; Ares, G.; Sfeir, A.; Wingeyer, A. y Usunof E., 2010. Efecto de la labranza y la cobertura vegetal sobre el escurrimiento y la pérdida de suelo en la región central de la provincia de Buenos Aires. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo* 42 (1) pp 93-106.
 - Chuvieco, E., Martínez, S., Román, M, Hantson, S y Pettinari, M. L. 2014. Integration of ecological and socio-economic factors to assess global vulnerability to wildfire. *Global Ecology and Biogeography* (Global Ecol. Biogeogr) 23, pp 245–258
 - Delgado, M.I. y F.J.Gaspari. 2010. Geospatial morphometric characterization of a hydrographic basin. Case of study: Basin of the Belisario´s Creek, Argentina”. *Revista TECNOCENCIA Chihuahua* IV (3). Universidad Autónoma de Chihuahua. México.
 - Díaz-Rivera, J.; D Pérez Costa; Y Rodríguez Álvarez y Febles-González, J. 2008. Determinación de índices de erosión de suelos aplicando análisis SIG para la localidad de San Andrés en la provincia de Pinar del Río. *Revista Chapingo*. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 14 (1): pp 15-21. México.
 - Gaspari, F.J.; Senisterra, G.E., Delgado, M.I.; Rodríguez Vagaría, A.M. y Besteiro, S.I.. 2009. *Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas*. Primera Edición. (Ed) Gaspari. La Plata. 321 p.
 - Gaspari, F.J; Rodríguez Vagaría, A. M.; Delgado, M. I.; Senisterra, G. E. y Denegri, G. A. 2011. Vulnerabilidad ambiental en cuencas hidrográficas serranas mediante SIG. *Multequina* 20: pp 3-13.

-
- Instituto Geográfico Militar. (IGM), 1970. Cartas Topográficas. Escala 1:50.000.
 - INTA Castelar, 1989. Descripción de Cartas de Suelo de la Provincia de Buenos Aires. Cap.4.1: pp 43-55. Escala. 1:500.000.
 - INTA - SAGyP. 1989. Mapa de Suelos de la Provincia de Buenos Aires.
 - INTA, 1995. Atlas de Suelos de la República Argentina. Escala 1:500.000. Versión Digital
 - INTA – AEROTERRA. 1995. Atlas de suelo de la República Argentina. Versión digital en CD-ROM.
 - Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais (INPE). 2011. Ministerio de Ciencia y Tecnología de Brasil (www.inpe.br)
 - Irurtia, C.; Cruzate, G. y Gaspari, F. J. 2007. *Guía de divulgación técnica. Aplicación de la USLE en la provincia de Buenos Aires para establecer tasas de erosión hídrica*. Editores: INTA-UNLP. 25 p.
 - Jordán, A. y Bellinfante, N. 2000. Cartografía de la erosividad de la lluvia estimada a partir de registros pluviométricos mensuales en el Campo de Gibraltar (Cádiz). *Edafología* 7(3): pp 83-92. <http://edafologia.ugr.es/revista/tomo7tr/a83v7tt.htm>
 - López Bidone, E. 2010. El capital intangible y el proceso de reorganización sectorial como génesis de la competitividad territorial. Tandil como caso de estudio. *Observatorio de la Economía Latinoamericana* N° 125. <http://www.eumed.net/cursecon/ecolat/ar/>
 - PNUD, 1986. Proyecto Argentina 85/019. Área edafológica. *Aptitud y uso actual de las tierras argentinas*. Anexo Mapa de aptitud y uso de las tierras de la provincia de Buenos Aires. Secretaria de Agricultura Ganadería y Pesca. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires, Argentina. 32 p.
 - Servicio Meteorológico Nacional. 2011. Estadísticas Climatológicas, Serie 1985-2011.
 - Teutsch-Barros, C. 2006. *Metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad poblacional a los desastres de la variabilidad y el cambio climático*. Tesis de maestría. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas Escuela de Agronomía. Santiago, Chile. 79 p.
 - Thornthwaite, C.W. and Mather, J.R. 1957. *Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance*. Laboratory of Climatology, Publication núm. 10: Centertown, N. J.; 185–311.

-
- Van Westen, C. y Soeters, R. 1999. *Geographic Information Systems in Slope Instability Zonation*. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences. ITC. pp 156.
 - Vázquez, P. 2014. Agriculturization and environmental impacts in a representative area of the ecoregion of the Pampas, Argentina. *Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium*, Ituiutaba, 5 (1), pp 20-45.
 - Vázquez, P. y Zulaica, L. 2011. Cambios en el uso de la tierra del partido de Tandil y principales impactos ambientales. *Revista Párrafos geográficos*. 10 (2) pp 242-267.
 - Zanella, M. E; Correia Dantas, E. y Sampaio Olímpio, J. I. 2011. A vulnerabilidade natural e ambiental do Município de Fortaleza/Ce. *B. Goiano. Geog. Goiânia*. 31 (2) pp 13-27.